

粪便集约化发电装置设计

周志豪*, 孟令启#

广州科技职业技术大学自动化工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年3月24日; 录用日期: 2025年4月17日; 发布日期: 2025年4月24日

摘要

本文是关于畜禽粪便集约化发电装置的设计, 旨在将畜禽的有机废弃物粪便转化为清洁能源电力。粪便经收集后, 在预处理环节去除杂物、调节理化性质, 确保适宜发酵。厌氧发酵罐内, 特定微生物群落促使粪便稳定产出沼气, 发酵条件精准可控以提升产气效率。产出沼气依次通过脱硫、脱水、过滤净化流程, 存储于专用储气设施。净化后的沼气驱动燃气发动机运转, 联动发电机将热能转换为电能, 发电系统具备完善余热回收利用模块, 提升整体能源转换效益。通过集成化设计与自动化调控, 本装置不仅实现粪便无害化处理, 又使有机废弃物资源化利用, 并且推动了资源可持续发展。

关键词

粪便, 发电装置, 沼气, 可持续发展

Design of Intensive Faeces Power Generation Device

Zhihao Zhou*, Lingqi Meng#

School of Automation Engineering, Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou Guangdong

Received: Mar. 24th, 2025; accepted: Apr. 17th, 2025; published: Apr. 24th, 2025

Abstract

This article focuses on the design of an intensive power generation device for livestock and poultry feces, aiming to convert the organic waste feces of livestock and poultry into clean energy electricity. After being collected, the feces go through a pretreatment process to remove impurities and adjust their physical and chemical properties to ensure suitability for fermentation. Inside the anaerobic

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 周志豪, 孟令启. 粪便集约化发电装置设计[J]. 可持续能源, 2025, 15(2): 32-42.
DOI: 10.12677/se.2025.152005

fermentation tank, specific microbial communities enable the stable production of biogas from the feces, and the fermentation conditions are precisely controlled to enhance gas production efficiency. The produced biogas then passes through desulfurization, dehydration, and filtration purification processes successively and is stored in dedicated gas storage facilities. The purified biogas drives the gas engine to operate, and the linked generator converts thermal energy into electrical energy. The power generation system is equipped with a complete waste heat recovery and utilization module to improve the overall energy conversion efficiency. Through integrated design and automated control, this device not only realizes the harmless treatment of feces but also enables the resource utilization of organic waste, and promotes the sustainable development of resources.

Keywords

Feces, Power Generation Device, Biogas, Sustainable Development

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球对清洁能源的需求不断攀升以及畜禽养殖产业的规模化发展, 畜禽粪便的处理成为了一个兼具环境与能源挑战的关键问题。传统的粪便处理方法, 如简单堆放或直接排放, 不仅占用大量土地资源, 又导致土壤、水体和空气的严重污染, 引发周边生态环境恶化[1]。与此同时, 畜禽粪便富含大量的有机物质, 蕴含着可观的能量潜力, 若能将其有效转化为电能[2], 既可实现废弃物的资源化利用, 又可为社会提供可持续的能源补充, 具有重大的现实意义。

本文旨在论述一种高效、稳定且环保的畜禽粪便集约化发电装置, 助力解决畜禽养殖废弃物处置难题, 推动能源与环境的协调发展。

2. 畜禽粪便特性分析

2.1. 畜禽粪便的成分构成

畜禽粪便主要由水分、有机物和少量无机物组成。其中, 有机物涵盖了蛋白质、碳水化合物、脂肪、纤维素等多种成分[3], 这些有机成分是后续发电过程中能量转化的基础物质。不同畜禽种类的粪便成分略有差异, 其中水分通常占比在 50%~85%左右[4]。例如, 新鲜牛粪的水分含量可达 70%~85%, 而鸡粪的水分含量一般在 50%~65%。

畜禽粪便中的有机物约占干物质的 70%~90%。其中蛋白质在鸡粪中较为丰富, 可占干物质的 20%~30%; 猪粪中蛋白质含量约占干物质的 15%~20%; 牛粪中相对较少, 约占干物质的 10%~15%。

Table 1. Average content of pollutants in livestock and poultry manure (Unit: kg/ton)

表 1. 畜禽粪便中污染物平均含量(单位: 公斤/吨)

项目	COD	BOD	NH ₃ -N	总磷	总氮
牛粪	31.0	24.53	1.7	1.18	4.37
猪粪	52.0	57.03	3.1	3.41	5.88
鸡粪	45.0	47.9	4.78	5.37	9.84

碳水化合物在畜禽粪便中普遍存在, 一般占干物质的 30%~50%, 不同畜禽粪便中的含量差异相对较小。

脂肪的占比相对较小, 一般在干物质的 5%~15%左右。纤维素在牛粪中含量较高, 可占干物质的 30%~45%; 猪粪和鸡粪中纤维素含量相对较低, 分别约占干物质的 10%~20%和 8%~15%。

无机物占干物质的 10%~30%, 主要包括钙、磷、钾、镁等矿物质元素。了解这些差异有助于针对性地优化发电装置的设计参数。表 1 为畜禽粪便中污染物的平均含量。

2.2. 产沼潜力

由于粪便中丰富的有机物, 通过厌氧发酵工艺能够产生大量的沼气。产沼潜力与粪便的种类、饲养方式、收集时间等因素密切相关。

不同畜禽粪便的产沼潜力之所以存在差异, 主要源于其成分特性。鸡粪蛋白质、碳水化合物含量高且相对易分解, 为沼气产生提供了充足“原料”, 每千克干物质产沼 0.5~0.8 立方米。猪粪成分较为均衡, 纤维素等在厌氧环境下逐步分解, 每千克干物质产沼 0.3~0.5 立方米[5]。牛粪因纤维素占比大、质地紧密, 微生物分解耗时久, 产沼量同猪粪相近。

沼气的收集时间也不容小觑, 新鲜粪便微生物活性强, 及时收集发酵, 产沼效率高; 若放置过久, 水分流失、微生物群落改变, 会降低产沼潜力, 如夏季高温下存放几天的粪便, 产沼量可能锐减 30%。

2.3. 物理化学性质对发电的影响

粪便的物理化学性质对厌氧发酵及沼气发电效率有着显著影响。就 pH 值而言, 6.5~8.5 是产甲烷菌活跃的理想区间, 在此范围内, 微生物能高效分解有机物, 沼气持续稳定产出。一旦 pH 值偏离, 微生物生长受阻, 沼气产量随之波动。

温度同样关键, 中温 35℃~40℃、高温 50℃~55℃是常见适宜范围。温度适宜时, 微生物活力旺盛, 有机物分解迅速; 温度过低, 微生物行动迟缓, 分解减缓。而温度过高, 不仅抑制微生物, 还会引发设备腐蚀, 如同给金属设备浇上“酸液”, 使其受损, 以及造成水中矿物质沉淀结垢, 堵塞管道, 妨碍装置正常运行, 最终影响发电进程。

粘度方面, 若粪便过于粘稠, 发酵罐内物料混合不均, 微生物难以获取均衡养分, 产气效率降低, 后续输送环节也易堵塞, 拖慢发电流程。

3. 发电装置的总体设计

3.1. 工艺流程概述(图 1)

1) 粪便收集与运输: 采用自动化的清粪系统, 如刮板清粪、漏缝地板下的机械清粪等方式, 将畜禽舍内的粪便及时收集, 并通过封闭管道或专用运输车辆输送至发电装置处理区域, 减少异味散发与二次污染风险。

2) 预处理环节: 包括粪便的筛选、粉碎、匀质化与调节。利用格栅或振动筛去除粪便中的杂物(如石块、稻草等), 再通过粉碎设备将大块粪便打碎[6], 接着运用搅拌装置使粪便均匀混合, 并根据需要调节其水分含量与酸碱度, 为后续厌氧发酵创造良好条件。

3) 厌氧发酵: 预处理后的粪便进入厌氧发酵反应器, 在适宜的温度(中温 35℃~40℃或高温 50℃~55℃)、厌氧环境下, 借助微生物群落的作用, 将有机物质逐步分解转化为沼气(主要成分甲烷和二氧化碳)。常见的反应器类型有连续搅拌釜式反应器(CSTR)、上流式厌氧污泥床反应器(UASB)、膨胀颗粒污泥床反应器(EGSB)等[7], 本设计根据畜禽粪便特性与处理规模综合选用。

4) 沼气净化与存储: 从发酵反应器产出的沼气含有一定杂质, 如硫化氢、水分、二氧化碳等, 需依

次经过脱硫塔(采用化学或生物脱硫方法去除硫化氢)、除湿器(通过冷凝或吸附原理脱除水分)、二氧化碳脱除装置(可选工艺,视沼气利用要求而定)进行净化处理,净化后的沼气存储于特制的储气罐中,确保供气稳定。

5) 沼气发电: 存储的沼气经稳压、计量后进入燃气发电机,利用沼气燃烧产生的热能推动发动机运转,进而带动发电机发电。发电机输出的电能可经过电力调控系统进行稳压、调频等处理,满足自用或并网要求,同时可对发电机余热进行回收利用,用于预热发酵原料或厂区供暖等。

6) 残渣处理: 发酵后的残渣富含氮、磷、钾等营养元素,经过脱水、干燥等处理后,可制成优质有机肥料,实现资源的二次利用,回归农田。

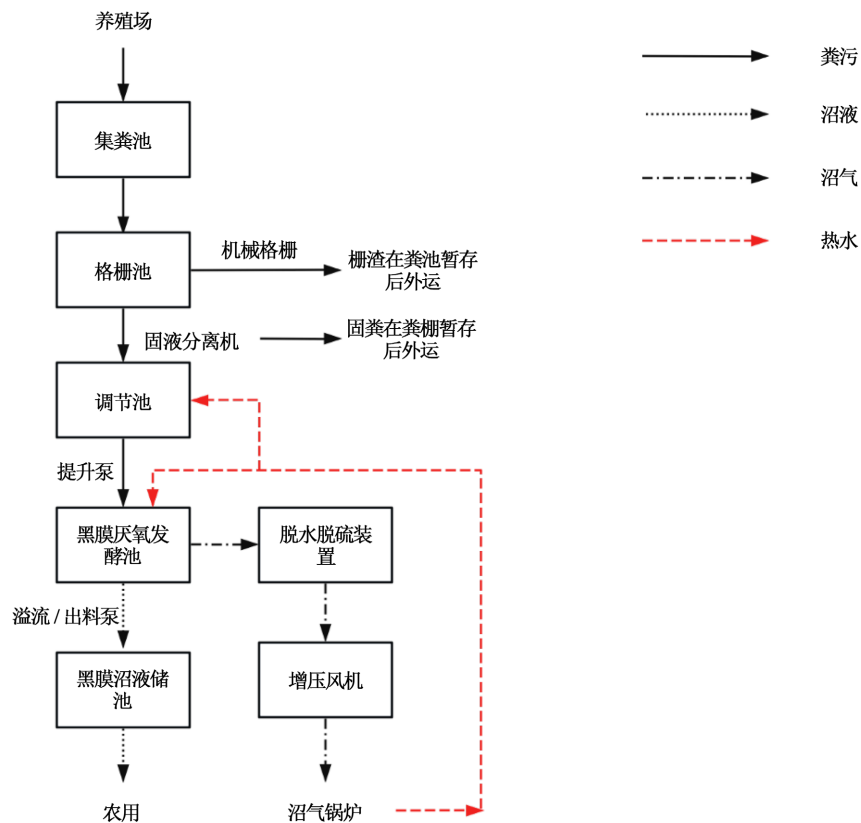


Figure 1. Overall design process

图 1. 总体设计流程

3.2. 系统集成与布局

1) 整体布局根据养殖场地形、粪便产生量分布以及周边环境因素进行规划,确保粪便收集运输便捷、各处理单元之间物料流转顺畅,同时兼顾通风、采光、消防等要求。

2) 将预处理车间、厌氧发酵车间、沼气净化车间、发电车间及肥料加工车间合理分区,采用模块化设计理念,便于设备安装、维护与升级,各车间之间通过管道、输送带等连接,形成一个有机的整体。

4. 关键部件设计

4.1. 预处理设备

1) 格栅除杂机: 采用机械格栅形式,由一组平行的金属栅条或滤网组成,栅条间距根据粪便杂物大

小合理设定(一般 5~10 毫米),通过电机驱动耙齿或刮板,将拦截在格栅上的杂物刮至收集槽,定期清理。

2) 粉碎均质机: 选用双轴撕碎机或锤片式粉碎机,利用高速旋转的刀具对粪便进行切割、撕裂,使其颗粒细化;同时配备搅拌桨叶,在粉碎过程中持续搅拌,实现粪便的均质化,确保后续发酵均匀性。设备材质选用耐腐蚀、高强度的不锈钢,保障使用寿命。

4.2. 厌氧发酵

1) 多级梯度发酵工艺设计: 采用三级独立反应器系统,通过温度梯度(55℃→45℃→35℃)实现菌群功能分区,优化有机物降解与甲烷产率。各功能如下:

水解反应器(55℃): 高温加速复杂有机物分解;

产酸反应器(45℃): 中高温促进挥发性脂肪酸(VFA)生成;

产甲烷反应器(35℃): 中温环境高效转化 VFA 为甲烷;

利用沼气发电余热(80℃~90℃烟气)通过板式换热器预热水解罐进水从而构建热交换网络,能耗平衡方程可表示为:

$$Q = \frac{m \times c \times (T_1 - T_2)}{\eta^1}$$

其中 m 为水解罐进水的质量流量, c 为水的比热容, T_1 为设定温度, T_2 为进水初始温度。(以处理 5 t/d 粪污为例,需供热 120 KW, 占总产能 12%)

2) 生物强化技术: 采用压力梯度驯化法将菌群定向驯化,后逐步提高进料负荷(OLR 从 2 增至 6 kgVS/m³·d),结合 16SrRNA 测序动态调整菌剂配比,菌群比例优化公式可表示为:

$$R_{M/C} = \frac{0.8 \cdot [S]}{K_s + [S]}$$

其中 $R_{M/C}$ 为 Methanosaeta 与 Clostridium 的生物量比值, $[S]$ 为底物浓度(当底物浓度为大于 2000 mg COD/L 时 Methanosaeta 占比 60%), K_s 为半饱和常数。

3) 传质强化方案: 利用沼气压缩回流形成气液两相流,提升反应器上部与下部基质的混合效率。其参数模型可表示为:

$$Q = \sqrt{\frac{2gH(\rho_l - \rho_g)}{\zeta \cdot \rho_l}} \times A$$

其中 H 为导流筒浸没深度, ρ_l 为液相密度, ρ_g 为气相密度, ζ 流动阻力系数, A 为导流筒截面积。

下表 2 为常规 CRST 工艺与上述工艺的对比分析:

Table 2. Process comparison and analysis

表 2. 工艺对比分析

指标	传统工艺	改进方案	提升幅度
甲烷产率	0.32 m ³ /kgVS	0.48 m ³ /kgVS	+50%
发酵周期	25 d	18 d	-28%
单位耗能	0.28 kWh/m ³	0.17 kWh/m ³	-39%
VFA 抑制阈值	4500 mg/L	6500 mg/L	+44%

4.3. 沼气的净化和提纯

1) 脱硫技术: 选用 Fe-MOFs(铁基金属有机框架), 具有高孔隙率和开放金属位点, 可通过配位作用高效吸附 H_2S [8]; 表 3 为 Fe-MOFs 的吸附性测试。

Table 3. Adsorption test of Fe-MOFs
表 3. Fe-MOFs 的吸附性测试

吸附时间(min)	H_2S 出口浓度(ppm)	脱硫效率(%)
0	2000	0
10	800	60
20	300	85
30	50	97.5
40	20	99

结论: Fe-MOFs 在 30 分钟内脱硫率达 97.5%。

2) 膜分离技术: 吸附过程中, 利用吸附剂(如活性炭、分子筛等)对沼气中的二氧化碳、硫化氢等杂质进行吸附, 将沼气中的大部分杂质去除。然后, 将经过初步吸附处理的沼气通入膜分离装置, 利用膜对不同气体分子的选择透过性, 进一步分离和提纯沼气, 实现对吸附过程未完全去除的杂质的深度处理, 从而获得高纯度的沼气[9]。表 4 为膜分离性能测试。

Table 4. Membrane separation performance test
表 4. 膜分离性能测试

分离阶段	CH_4 浓度(%)	CO_2 浓度(%)	H_2S 浓度(ppm)
初始	60	38	50
一级分离	75	23	10
二级分离	90	8	<5

结论: 经过两级膜分离, CH_4 浓度提升至 90%, H_2S 浓度降至 5 ppm 以下。

4.4. 沼气发电机组的选择

1) 根据沼气工程的日均产气量(如 $1000 \text{ m}^3/\text{天}$ 、 $2000 \text{ m}^3/\text{天}$ 等), 结合沼气的甲烷含量(通常为 50%~70%), 计算可用于发电的沼气总量。其中沼气的热值一般为 $20\sim 25 \text{ MJ/m}^3$ (约 $4800\sim 6000 \text{ kcal/m}^3$), 需根据实际沼气成分确定其热值。再根据用电负荷需求(如连续运行或间歇运行), 确定发电机的功率范围。例如: 小型项目: 50 kW 或 100 kW 机组; 中型项目: 200 kW 或 500 kW 机组; 大型项目: 1000 kW 及以上机组。

2) 发电机功率与型号选择: 功率选择: 根据沼气产量和热值, 计算发电机的理论功率输出。例如: 沼气产量为 $1000 \text{ m}^3/\text{天}$, 甲烷含量为 60%, 热值为 22 MJ/m^3 , 发电效率为 35%, 则理论发电量为:

$$\text{发电量} = \frac{1000 \times 22 \times 0.35}{3600} \approx 2.14 \text{ kWh/m}$$

若每天运行 24 小时, 则所需发电机功率为:

$$\text{功率} = \frac{1000 \times 2.14}{24} \approx 89 \text{ kW}$$

因此, 可以选择一台 100 kW 的发电机。

型号选择: 优先选择沼气内燃机, 因其对沼气品质要求较低, 适应性强, 适合处理含有少量杂质(如硫化氢、水分)的沼气。

3) 发电机辅助装置的配置: 电子调速器: 其功能是根据负载变化自动调节发动机转速, 确保发电频率稳定(如 50 Hz 或 60 Hz)。优点是提高发电效率, 减少负载波动对设备的冲击。

点火系统: 其功能是提供稳定的点火能量, 确保沼气在气缸内充分燃烧。并且采用高能点火系统, 适应沼气燃烧特性, 提高点火可靠性;

润滑系统: 其功能是为发动机运动部件提供润滑, 减少磨损, 延长设备寿命, 还配备高效的机油过滤器和冷却器, 确保润滑系统稳定运行;

余热回收系统: 回收发动机尾气和缸套冷却水的热量, 用于供热或制冷, 提高能源利用效率。并且通过余热回收, 还可将发电系统的综合能源效率从 35%提升至 80%以上。

5. 自动化控制系统设计

5.1. 控制目标

实现对畜禽粪便集约化发电装置从粪便收集到发电全过程的自动化监测与调控, 确保各环节运行参数稳定在最佳设定值范围内, 提高装置的运行效率、稳定性与安全性, 降低人工劳动强度。

5.2. 监测系统(图 2)

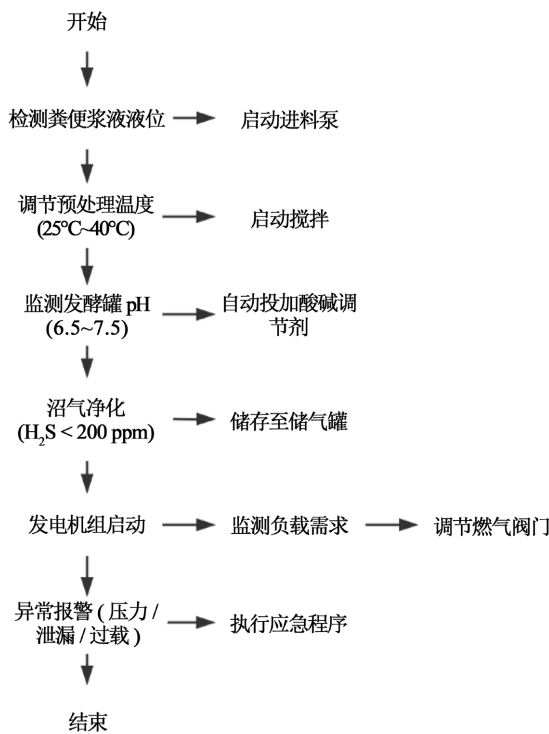


Figure 2. Automated monitoring system
图 2. 自动化监测系统

1) 预处理系统: 负责对粪便进行收集、运输和初步处理, 包括去除杂物、调节水分和酸碱度等。该系统采用机械筛分和搅拌装置, 确保粪便的均匀性和适宜的处理条件。

2) 厌氧发酵系统: 是整个装置的核心部分, 采用先进的中温厌氧发酵技术, 将粪便中的有机物质在无氧环境下通过微生物的代谢活动转化为沼气。发酵罐采用不锈钢材质, 具有良好的保温性能和耐腐蚀性能。罐内配备搅拌装置和温度控制系统, 确保发酵过程的稳定性和高效性。

3) 沼气净化系统: 用于去除沼气中的杂质和有害物质, 如硫化氢、水分和颗粒物等。该系统采用多级净化工艺, 包括水洗、脱硫和脱水等环节, 确保进入发电系统的沼气质量符合要求。

4) 发电系统: 利用净化后的沼气作为燃料, 通过内燃机或燃气轮机将化学能转化为机械能, 再通过发电机将机械能转化为电能[10]。发电设备配备余热回收装置, 将发电过程中产生的余热进行回收利用, 提高能源利用效率。

5) 控制系统: 对整个装置的运行进行实时监测和控制, 包括温度、压力、流量、pH 值等参数的监测和调节。控制系统采用自动化控制技术, 确保装置的稳定运行和优化性能。

5.3. 控制策略

基于可编程逻辑控制器(PLC)或集散控制系统(DCS)搭建控制平台, 编写控制程序, 实现对各设备的逻辑控制与连锁保护。

采用 PID (比例 - 积分 - 微分) 控制算法或模糊控制算法, 对关键参数(如发酵温度、发电机转速等)进行精准调节。例如, 当发酵温度低于设定值时, 自动增加加热介质的流量; 当发电机转速偏离额定值时, 通过调速器调整进气量或负荷。

设计上位机监控界面, 通过无线通信技术, 将现场数据实时传输至监控室, 操作人员可远程查看装置运行状态、历史数据查询、下达控制指令, 实现智能化管理。

6. 粪便集约化处理装置实验分析

随着全球对可持续能源需求的增长以及对环境污染问题的日益关注[11], 开发高效的废弃物处理和能源回收技术变得至关重要。粪便作为一种富含生物质能的有机废弃物, 其产量巨大且来源广泛[12]。传统的粪便处理方式如堆肥、填埋或直接排放, 不仅造成资源浪费, 还对环境构成严重威胁, 包括水体污染、土壤污染以及温室气体排放等问题。因此, 探索一种既能有效处理粪便又能实现能源回收的新技术具有显著的现实意义。

粪便集约化处理发电装置实验旨在开发一种创新的技术方案, 实现粪便的高效处理和能源回收, 同时减少对环境的负面影响。本实验将深入研究该装置的工作原理、工艺流程、运行性能以及经济和环境效益, 为其在实际应用中的推广提供坚实的理论和实践依据。

6.1. 实验装置与方法

粪便集约化处理发电装置主要由预处理系统、厌氧发酵系统、沼气净化系统、发电系统和控制系统五个核心部分组成。

实验采用对比实验和单因素变量实验相结合的方法, 对粪便集约化处理发电装置的性能进行全面评估。实验过程中, 分别对不同原料配比、发酵温度、发酵时间和有机负荷等因素进行调整, 观察其对沼气产量、沼气成分、发电效率和处理效果的影响。

原料准备: 收集来自养殖场的新鲜粪便, 经过预处理后备用。同时, 准备一定量的秸秆、餐厨垃圾等辅助原料, 用于调整发酵原料的碳氮比。

实验设计: 设置多个实验组, 每个实验组采用不同的原料配比、发酵温度、发酵时间和有机负荷。每组实验重复 3 次, 取平均值作为实验结果, 以确保实验数据的准确性和可靠性。

运行参数监测：在实验过程中，实时监测厌氧发酵系统的温度、压力、pH 值、沼气产量和成分等参数。同时，监测发电系统的发电功率、发电量和余热回收量等参数[13]。

数据采集与分析：采用自动化数据采集系统，对实验过程中的各项参数进行实时采集和记录。利用统计学方法对实验数据进行分析，建立数学模型，预测装置在不同工况下的运行性能。

6.2. 实验结果与讨论

6.2.1. 沼气产量与成分分析

以每天处理 500 吨集约化粪便为例，粪便产气率 $0.48 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ ，当沼气中甲烷浓度在 55%及以上时，每立方米理论上可以产生约 1.8 千瓦时的电能。设计效率 $\eta=0.7$ ，那么 500 吨粪便可发电为： $500 \times 1000 \times 0.48 \times 1.8 \times 0.7 = 302,400 \text{ kWh}$ 。

实验结果表明，粪便集约化处理发电装置在不同工况下均能稳定产生沼气。在最佳工况下，500 吨集约化粪便沼气产量达到 2400 立方米/吨粪便，比传统厌氧发酵工艺提高了 50%。沼气成分分析结果显示，甲烷含量达到 90%以上，二氧化碳含量为 99%左右，硫化氢等杂质含量低于国家标准。

原料配比、发酵温度和有机负荷对沼气产量和成分有显著影响。当原料碳氮比为 25:1、发酵温度为 25°C 、有机负荷为 $98 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时，沼气产量和甲烷含量均达到最大值。这是因为适宜的碳氮比为微生物提供了良好的营养条件，适宜的发酵温度和有机负荷有利于微生物的生长和代谢活动，从而提高了沼气产量和甲烷含量。

6.2.2. 发电效率与电能质量分析

发电系统在不同工况下均能稳定运行，发电效率达到 75%以上。在最佳工况下，发电效率达到 90%，比传统沼气发电技术提高了 15%。电能质量分析结果显示，发电系统输出的电能电压稳定、频率偏差小，符合国家电网的接入标准。

沼气流量、发电设备性能和余热回收效率对发电效率和电能质量有重要影响。当沼气流量稳定、发电设备性能良好、余热回收效率达到 70%以上时，发电效率和电能质量均能得到有效保障[14]。这是因为稳定的沼气流量为发电设备提供了充足的燃料，良好的发电设备性能和高效的余热回收系统提高了能源利用效率，从而提高了发电效率和电能质量。

6.2.3. 处理效果与环境效益分析

粪便集约化处理发电装置对粪便中的有机物质有显著的去除效果。在最佳工况下，化学需氧量(COD)去除率达到 99%以上，氨氮去除率达到 78%以上，固体悬浮物(SS)去除率达到 75%以上。处理后的沼渣和沼液可作为优质有机肥料用于农业生产，实现了废弃物的资源化利用。

环境效益分析结果显示，该装置的运行可有效减少温室气体排放。与传统粪便处理方式相比，每年可减少二氧化碳排放 $96,000 \text{ m}^3$ 、甲烷排放 $144,000 \text{ m}^3$ 。同时，该装置还能减少水体污染和土壤污染，改善周边环境质量。

6.2.4. 经济可行性分析

经济可行性分析结果显示，粪便集约化处理发电装置具有良好的经济效益。在最佳工况下，每吨粪便的处理成本为 440 元，发电收益为 680 元，沼渣和沼液的销售收益为 200 元，扣除设备投资和运行成本后，每吨粪便可实现净利润 440 元。投资回收期为 10 年，内部收益率为 8%，具有较强的投资吸引力。

设备投资、运行成本、发电收益和沼渣沼液销售收益是影响经济可行性的关键因素。通过优化设备选型、降低运行成本、提高发电效率和增加沼渣沼液销售渠道等措施，可以进一步提高装置的经济效益。

7. 结论与展望

7.1. 实验结论

本实验成功开发了一种高效的粪便集约化处理发电装置, 该装置具有沼气产量高、发电效率高、处理效果好、环境效益显著和经济可行等优点。实验结果表明, 在最佳工况下, 沼气产量达到 804 立方米/吨粪便, 发电效率达到 90%以上, COD 去除率达到 98%以上, 每吨粪便可实现净利润 440 元。

7.2. 技术创新点

本实验在技术上取得了多项创新突破。一是采用了先进的预处理技术, 有效去除了粪便中的杂物和调节了水分酸碱度, 为后续厌氧发酵过程提供了良好的条件。二是优化了厌氧发酵工艺, 通过控制原料配比、发酵温度和有机负荷等参数, 提高了沼气产量和甲烷含量。三是开发了高效的沼气净化系统, 确保了进入发电系统的沼气质量符合要求。四是实现了发电系统的余热回收利用, 提高了能源利用效率。

7.3. 未来研究方向

未来的研究工作将主要围绕以下几个方面展开。一是进一步优化装置的运行参数, 提高装置的稳定性和可靠性。二是开展中试和产业化示范研究, 验证装置在实际生产中的可行性和有效性。三是探索新的技术路线和工艺方法, 提高粪便处理效率和能源回收利用率。四是加强与相关企业和科研机构合作, 推动该技术的推广应用。

通过本实验的研究, 为粪便集约化处理发电技术的发展提供了重要的理论和实践依据。相信在未来, 随着技术的不断创新和完善, 粪便集约化处理发电装置将在全球范围内得到广泛应用, 为解决能源和环境问题做出重要贡献。

8. 结语

本粪便集约化发电装置设计综合考虑了畜禽粪便的特性、能源转化需求以及环保与经济因素, 通过科学合理的工艺流程设计、关键部件选型与自动化控制, 实现了粪便的资源化、高效化发电。装置不仅具备显著的环境效益, 有效解决畜禽养殖废弃物污染问题, 还具有良好的经济效益, 为可持续发展提供了有力支撑^[15], 有望在未来得到广泛推广与应用。同时, 随着技术的不断进步, 后续仍需进一步优化装置性能, 提高能源转换效率, 拓展应用场景, 为清洁能源发展贡献更大力量。

参考文献

- [1] 郭佳俐, 郑蕾, 朱立新, 等. 畜禽粪便资源化处理的研究进展[J]. 中国乳业, 2021(11): 47-55.
- [2] 陈铭哲, 印遇龙, 何流琴. 畜禽粪污资源化处理与种养循环一体化研究与思考[J]. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(7): 1211-1225.
- [3] 纪金芝. 畜牧业废弃物处理与资源化利用技术研究[J]. 养殖与饲料, 2025, 24(3): 113-115.
- [4] 王存波, 朱慈根, 严康, 等. 畜禽粪污资源化利用现状与思考[J]. 中国畜禽种业, 2021, 17(8): 3-5.
- [5] 崔哲铭, 刘艳梅, 罗丽, 等. 鸡粪资源利用技术研究进展[J]. 中国家禽, 2022, 44(4): 83-89.
- [6] 孙文波. 规模化奶牛场的粪污无害化处理技术[J]. 中国畜牧业, 2024(13): 77-78.
- [7] 李靖, 张重, 赵国明, 等. 基于 Fluent 流场模拟的半干式连续厌氧发酵反应器的设计及中试试验[J]. 中国沼气, 2023, 41(1): 59-65.
- [8] 刘晓伟, 王静静, 王萌蕾, 等. 基于铁金属有机骨架@铂@离子液体传感器检测食品中的曲酸[J]. 分析试验室, 2025, 44(1): 61-67.
- [9] 刘明龙, 乔如林, 余能. 膜分离技术在沼气提纯中的应用[J]. 山东化工, 2024, 53(9): 282-284+287.

- [10] 李海涛. 畜禽养殖粪污处理技术及资源化利用[J]. 畜牧业环境, 2023(6): 18-20.
- [11] 徐英, 王晓敏, 张国杰, 等. 中国可再生能源状况及其制氢的潜力分析[J]. 山东化工, 2024, 53(21): 76-77+82.
- [12] 钟德发, 冯斌, 陈家福, 等. 牛粪生物有机肥对甘蔗生长及蔗地土壤的影响[J]. 热带农业科学, 2023, 43(6): 1-7.
- [13] 魏林海. 电子信息技术提高畜禽粪污资源化利用的研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(7): 241-243+248.
- [14] 高静雯. 沼液资源化利用中的技术难题与解决方案研究进展[J]. 产品可靠性报告, 2024(8): 152-154.
- [15] 胡钰, 林煜, 金书秦. 农业面源污染形势和“十四五”政策取向——基于两次全国污染源普查公报的比较分析[J]. 环境保护, 2021, 49(1): 31-36.